

ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР им. Б. И. ВЕРКИНА

На правах рукописи

Пилипенко Юрий Александрович

РАССЕЯНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ И ФОНОНОВ В
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТОЧЕЧНЫХ КОНТАКТАХ

01.04.07 - физика твердого тела

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

ХАРЬКОВ - 1995



00755657 (Z)

Дисертація являється рукописью

AB 33.812

Работа выполнена в Физико-техническом институте низких температур им. Б. И. Веркина НАН Украины.

Научные руководители: академик НАН Украины,
доктор физико-математических наук,
профессор Янсон И. К.
кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник
Балкашин О. П.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник
Колесниченко Ю. А.
кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник
Ревенко Ю. Ф.

Ведущая организация: Харьковский Государственный Университет

Защита состоится " _____ " _____ 1996 г. в _____ часов
на заседании Специализированного Совета Д02.35.02 при Физико-техническом
институте низких температур им. Б. И. Веркина НАН Украины по адресу:
г. Харьков, пр. Ленина, 47, ФТИНТ НАНУ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физико-технического
института низких температур им. Б. И. Веркина НАНУ

Автореферат разослан " _____ " _____ 1996 г.

Ученый секретарь Специализированного совета,
доктор физико-математических наук

А. С. Ковалев

Общая характеристика работы

Актуальность. Среди методов прямого определения энергетического спектра квазичастиц, времени их релаксации в последнее время появился метод микроконтактной спектроскопии (МКС). Он основан на явлении перераспределения энергии электронов в микроконтакте (МК) и их релаксации, сопровождаемой неупругим рассеянием на квазичастицах. Это рассеяние приводит к нелинейностям вольт-амперной характеристики (ВАХ) контакта таким, что вторая производная ВАХ представляет спектр взаимодействия электронов с квазичастицами, например, с фононами, т.е. представляет спектр ЭФВ [1].

Однако, МК спектрам кроме особенностей ЭФВ присущи некоторые детали, не обусловленные фононной структурой исследуемых металлов. Это – нулевые аномалии (НА), фон, а также вариации формы и интенсивности фононных особенностей. Среди возможных причин их происхождения рассматриваются различные сопутствующие процессы рассеяния электронов и фононов в контакте [1-3]. Многообразие релаксационных процессов, которые могут реализоваться в контакте и привести к изменению формы МК спектра ЭФВ, определяет разнообразие его высокочастотных свойств [4-8].

Т.о., в токовом состоянии в зависимости от соотношения длин свободного пробега электронов и фононов и диаметра контакта, в последнем могут протекать различные процессы рассеяния, отличающиеся характерными энергиями и частотами релаксации. При этом возможно сосуществование, взаимозависимость и взаимовлияние этих процессов. Комплексное изучение последних представляет исключительный интерес в плане раздвигания исследований малонизученных и новых релаксационных явлений в физике микроконтактов, а также практически необходимо для корректного восстановления однофононных спектров ЭФВ из измеренных характеристик.

Целью работы является экспериментальное комплексное исследование процессов рассеяния электронов и фононов в контактах нормальных металлов, которые обуславливают во всем энергетическом диапазоне зависимость МК спектра от параметров контакта, частоты и мощности внешнего излучения.

Научная новизна. Проведенные исследования позволили получить следующие новые результаты, которые выносятся на защиту.

1. Разработана методика комплексного исследования тех процессов рассеяния электронов и фононов в контакте, которые обу-

словливают зависимость МК спектра от параметров контакта, частоты и мощности излучения. Для реализации этой методики разработаны способы, включающие получение и выделение контактов с преимущественным типом рассеяния, а также определение их параметров (упругой длины λ и диаметра d); разработан многоканальный широкодиапазонный МК спектрометр.

2. Установлено, что как дефекты структуры, так и примесь приводят к изменению МК спектра ЭФВ соответствующему расчетному изменению фоновому спектру при аморфизации – уширению поперечного и исчезновению продольного пиков. Обнаружено 2 типа НА, происхождение которых может быть связано с рассеянием на примесном кислороде и поверхности.
3. Доказано существование двух факторов формирования фона – небаллистичность по электронам и фононам. Продемонстрировано, что от соотношения их вкладов зависят свойства контактов на низкой и высокой частоте. При измерении на частотах, превышающих частоту релаксации фононов, обнаружены предсказанный теорией эффект уменьшения фона и ранее неизвестный эффект демаскирования скрытых фоном спектральных особенностей. Показано, что такие частотные измерения являются аналогом изменения баллистичности по фононам.
4. Показано, что с особенностями частотной дисперсии проводимости контакта связаны различные релаксационные явления: фонон-электронная и фонон-фононная релаксация, неоднородная релаксация фононов и релаксация температуры контакта.
5. Обнаружены эффекты изменения формы и перераспределения амплитуд фононных особенностей в МК спектре ЭФВ, обусловленные релаксацией электронов и фононов.
6. Обнаружено явление параметрического регулирования режима пролета фононов и электронов инжекцией неравновесных фононов в область контакта от внешнего источника.
7. Предложен и осуществлен способ определения частоты релаксации квазичастиц. Уникальность этого способа в том, что он применим при малой длине свободного пробега квазичастиц, составляющей доли мкм. Определены частоты релаксации фононов в *Au*, *Si*, *Ge*. Изобретен и внедрен способ высо-

кочастотной МКС, позволяющей разделять вклады процессов, различающихся частотами релаксации, что повышает информативность метода МКС.

Достоверность результатов, полученных в данной работе, обеспечивается их самосогласованностью и воспроизводимостью, а также комплексностью проведенных исследований. Кроме того, результаты согласуются с имеющимися данными существующих теорий из экспериментов других авторов.

Научная и практическая ценность полученных результатов определяется формированием новых направлений метода МКС: исследование квазичастичных поверхностных возбуждений на границе раздела металл - диэлектрик; изучение различных релаксационных процессов, протекающих в контакте; параметрическое регулирование режима пролета фононов и электронов; корректное восстановление однофононных спектров из измеренных характеристик.

Выполнен ряд конкретных разработок, представляющих самостоятельную ценность и возможность независимого использования: способы получения и выделения контактов с преимущественным типом рассеяния, а также определение их параметров; способ определения времени релаксации квазичастиц, способ высокочастотной МКС.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на II и III Всесоюзных школах-семинарах по актуальным вопросам физики сверхпроводимости и нормальных металлов (Харьков 1984, 1988); Всесоюзной школе "Неравновесные явления в металлических микроконтактах" (Черноголовка, 1986). XXV Всесоюзном совещании по физике низких температур (Ленинград, 1988); III Международной конференции по физике фононов (Гейдельберг, ФРГ, 1989); I Международной конференции по микроконтактной спектроскопии (Харьков, 1991).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 9 работ, список которых приведен в конце автореферата.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы. Диссертация изложена на 196 страницах, содержит 52 рисунка и 14 таблиц. Библиография содержит 142 наименования.

Личный вклад. Все результаты, вошедшие в диссертацию, получены либо лично, либо при непосредственном участии автора. Работы, включенные в диссертацию, выполнены диссертантом в соавторстве и самостоятельно. При этом участие диссертанта проявлялось на всех этапах исследования: в постановке задачи, разработке методики, а также способов

и устройств для ее реализации, в проведении экспериментов, обработке результатов и формулировке выводов.

Содержание диссертации

Во введении дана общая характеристика работы, приводятся краткое содержание и основные результаты.

Глава 1 является обзорной. В ней изложены основные положения метода микроконтактной спектроскопии и полученные с его использованием результаты исследования металлов, обоснована актуальность темы и сформулирована задача исследования.

В главе 2 изложены методика и техника эксперимента, которые в соответствии с целью работы допускают комплексное исследование процессов рассеяния электронов и фононов в контакте.

В начале рассмотрены и сопоставлены различные независимые подходы в экспериментальном исследовании кинетических явлений МК-методом. Это – подход, основанный на эмпирических правилах отбора, либо состоящий в создании средствами нанотехнологии микросужений с контролируруемыми параметрами, а также подход, используемый в данной работе. Последний допускает комплексное изучение всех процессов, протекающих в контакте, путем объединения различных зависимостей МК спектра от параметра контакта и внешних полей на основе модельного определения параметров контакта.

В рамках этого подхода изложена методика исследования процессов рассеяния электронов и фононов в контактах, обуславливающих зависимость МК спектра от параметров контакта и частоты внешнего излучения. При этом обнаружение, выделение и идентификация различных процессов осуществляется путем независимого контролируемого варьирования условий создания контактов, варьирования их параметров, а также частоты и мощности излучения.

Разработанная методика включает следующие моменты.

1. Объектами исследования являются контакты из металлов, перекрывающих весь диапазон дебаевских энергий $\hbar\omega$: *Al, Cu, Be*.
2. Исследуются контакты в широком диапазоне упругих длин λ и диаметров d . Для этого применяется планарная технология и сдвиговая методика получения контактов в широком интервале значений. При этом один из электродов выполняется предельно малого размера и с малой жесткостью связи с корпусом.

- что допускает получение стабильных контактов в широком интервале значений d , включая предельно малые.
3. Спектры измеряются в широком диапазоне частот, включающем область частот исследуемых релаксационных процессов. При этом используется модуляционная методика. Ток через контакт модулируется низкочастотным либо высокочастотным сигналом и из спектра выделяется слагаемое пропорциональное второй производной ВАХ и регистрируется в функции напряжения смещения. Разработанный многоканальный широкодиапазонный МК спектрометр позволяет измерять характеристики контакта, необходимые для определения параметров контакта и изучения частотной дисперсии. МК спектрометр регистрирует ВАХ, первую гармонику модулирующего сигнала $V_1(V)$, МК спектр на звуковой частоте, как вторую гармонику модулирующего сигнала $V_2(V)$, а на высокой частоте в диапазоне характерных частот релаксации, как сигнал детектирования $U_d(V)$, а также сигнал на разностной частоте $U_{\text{мн}}$.
 4. Для определения параметров контакта ℓ и d предложен способ, основанный на использовании соотношений для электросопротивления контакта и интенсивности спектра, связывающих измеряемые характеристики R , V_1 , V_2 и искомые параметры ℓ и d .

Глава 3 посвящена исследованию рассеяния электронов на примеси, поверхности и дефектах структуры.

Для этого получены, измерены и определены параметры медных контактов в интервалах значений 0,4-100 и 0-500 нм для ℓ и d соответственно. Существенно, что контакты создавались с регулированием плотности структурных дефектов по типу игла-плоскость. Плоским электродом являлась пленка, осаждаемая в вакууме, с изменением температуры осаждения (78-800К) и отжига (300-900К). Упругая длина в пленке ℓ_1 определялась с учетом отношения $R_{300}/R_{4.2}$ и находилась в интервале 8-300 нм.

Получена диаграмма распределения ℓ по ℓ_1 , в которой верхняя граница значений ℓ представляет функциональная зависимость $\ell = \ell(\ell_1)$, нижняя - неизменна и находится на уровне значения постоянной решетки ($a=0,36$ нм), а уменьшение ℓ в интервале между этими граничными значениями для контактов, полученных на одной пленке, сопровождается появлением и ростом НА. Это демонстрируют спектры кон-

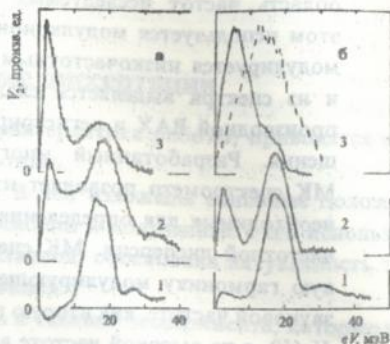
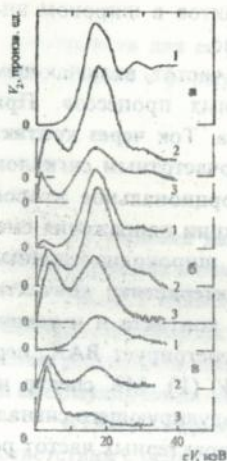


Рис. 1. Распределение контактов по интенсивности и форме МК спектра в зависимости от ϵ при разных значениях ϵ_n , нм: 297 (а); 43,5 (б); 8,4 (в). Параметры контактов R Ом, ϵ и d нм соответственно:

- а. 1 – 5,4; 25,0; 15. 2 – 27,2; 9,0; 6,9. 3 – 5,2; 2,3; 48,0.
 б. 1 – 11,4; 3,2; 19. 2 – 29,8; 2,4; 10,0. 3 – 39,0; 1,4; 11,5.
 в. 1 – 52,6; 0,6; 12. 2 – 40,0; 0,5; 28,0. 3 – 36,5; 0,4; 35,0.

Рис. 2. Эволюция МК спектров при изменении ϵ и фиксированном значении $d=7\pm 2$ нм (а) и при изменении d и фиксированном значении $\epsilon=1,45$ (б). Параметры контакта R Ом, ϵ и d нм соответственно:

- а. 1 – 54; 28,0; 4,3. 2 – 47,5; 2,6; 6,8. 3 – 8,3; 1,8; 8,3.
 б. 1 – 11; 1,5; 34,0. 2 – 22,0; 1,4; 19,0. 3 – 110 – –
 167 – пунтир

тактов, полученные на разных пленках, представляющих сечения диаграммы при разных ϵ_n (рис 1.): контакты с максимальной ϵ (1а, 1б, 1в) не имеют НА, а с минимальной – НА сравнима со спектром и превышает его. Т.о., контакты на этой диаграмме упорядочены действием двух факторов.

Первый – это изменение плотности структурных дефектов в пленке. Он приводит к функциональной зависимости, отражающей роль структурного рассеяния (кривые Ia, Ib, Iv). С повышением его интенсивности уширяется T - и исчезает L - пик, что соответствует расчетному изменению фононного спектра при аморфизации.

Второй – это рассеяние, дополнительное к структурному, приводящее к уменьшению ϵ с появлением НА. Поэтому контакты в горизонтальном сечении диаграммы, т.е. при $\epsilon = \text{const}$, но $\epsilon_n \neq \text{const}$ представляют разный тип рассеяния (структурный и дополнительный к нему), но фононные особенности у них совпадают.

Т. о., структурное и дополнительное к нему рассеяние приводят к эффектам аморфизации, а дополнительное – кроме того к НА.

Однако, как следует из экспериментальных данных амплитуда НА является функцией двух переменных ϵ и d ; НА представлена двумя типами, различающимися формой и положением максимума. На рис. 2 приведены две серии, демонстрирующие зависимость НА от ϵ (а) и d (б).

Наблюдаемая инверсия НА (рис. 2а) ее рост, форма, положение максимума, а также сопутствующее изменение фононных особенностей совпадают с экспериментальными данными по изменению концентрации примеси в меди. Такое поведение НА согласно теории [9] связано с переходом от упругого к неупругому рассеянию с переворотом спина вследствие магнитного упорядочения с повышением концентрации примеси.

Парамагнитный характер поведения НА, резко неоднородное распределение примеси по глубине (свидетельством чего является микроконтактное зондирование), а также ряд других данных позволяет утверждать, что этой примесью является кислород.

Вторая серия (рис. 2б) демонстрирует другой тип НА. С уменьшением d возрастает роль поверхностных слоев в процессах рассеяния, что может быть другой причиной происхождения НА. Теория [10] предсказывает появление вклада в МК спектр, обусловленного неупругим рассеянием на фонах либо других поверхностных состояниях вблизи границы металл-диэлектрик. Этот вклад увеличивается для контактов типа чистый канал, чистое отверстие с грязными берегами, что согласуется с экспериментальными данными – нашими и других авторов.

В главе 4 исследована релаксация фононов. С этой целью изучено поведение фона, который представлен на низкой частоте в зависимо-

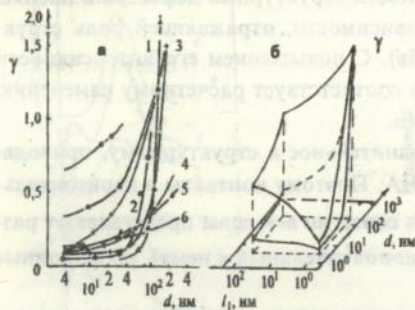


Рис. 3. Зависимость коэффициента фона от параметров контакта l и d на низкой частоте для медных контактов:

а) зависимость $\gamma = \gamma(d)$ при разных значениях l (1-6) в интервале 0,8–50 нм.; б) 3-мерное представление зависимости $\gamma = \gamma(l, d)$.

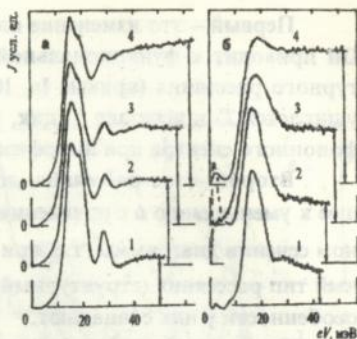


Рис. 4. Спектры контактов, для которых преобладающим фактором формирования фона является нарушение условия баллистичности для фононов (а), либо электронов (б).

сти от d для различных l (рис. 3а) и в трехмерном виде (б). Эти данные демонстрируют действие двух факторов формирования фона: небаллистичность по фононам и электронам. Первый приводит к монотонному возрастанию фона при переходе от баллистического режима к диффузионному вследствие релаксации электронов с многофононной генерацией, что дает вклад в спектр типа фона – нижняя поверхность на рис. 3б. Второй фактор приводит к увеличению фона в интервале между нижней и верхней поверхностями (рис. 3б) вследствие релаксации фононов на электронах, т.е. их реабсорбции.

От соотношения этих вкладов зависят свойства контактов на низкой и высокой частотах. Это демонстрирует эволюция формы спектра на НЧ (рис. 4) с изменением баллистичности для фононов (а) и электронов (б). В первом случае возрастающий фон маскирует высокоэнергетические спектральные особенности, хотя острота пиков при этом сохраняется. А во втором – возрастание фона приводит к уширению T - и исчезновению L - пика.

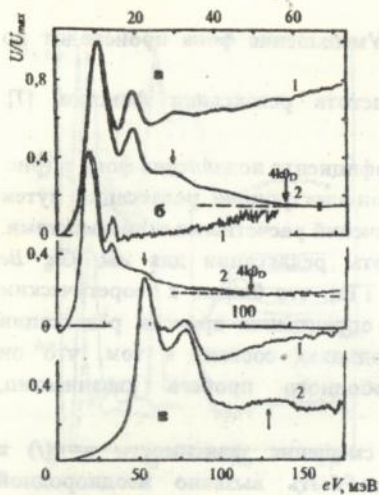


Рис. 5. МК спектр ЭФВ золота (а), меди (б), и бериллия (в), измеренные на звуковой частоте (1) и на частоте 4,8 для Au и 80 ГГц для Cu и Be (2).

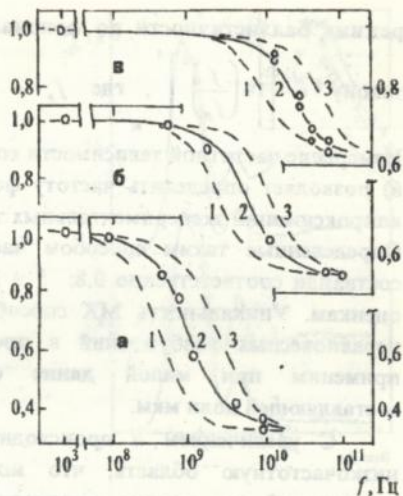


Рис. 6. Частотная зависимость отклика контакта при смещении $eV > \hbar\omega_D$ для Au (а), Cu (б) и Be (в). Точки – экспериментальные значения отклика. Линии – теоретические зависимости $h = h(f, f_p)$ аппроксимирующие экспериментальные данные при разных значениях f_p .

Теория [7] предсказывает уменьшение фона при измерении на частотах, превышающих частоту релаксации фононов. Представленные спектры (рис. 5) измерены на низкой и высокой частоте. Частоты измерения превышают частоты релаксации, определенные по оценочной формуле $f_p = \Lambda f_D S / v_F$. Наблюдаемое уменьшение фона сопровождается демаскированием скрытых фоном спектральных особенностей на комбинационных энергиях. С нарушением баллистичности по электронам эффект демаскирования ослабляется или отсутствует полностью.

Аналогичное изменение спектра происходит на низкой частоте (рис. 4) с изменением баллистичности для фононов (а) и электронов (б). В первом случае уменьшение фона приводит к демаскированию, а во втором – нет. Т.е. частотные измерения являются аналогом изменения

режима баллистичности по фононам. Уменьшение фона происходит по закону $\eta \sim \left[1 - \left(\frac{f}{f_p} \right)^2 \right]^{-1}$, где f_p - частота релаксации фононов [7].

Измерение частотной зависимости коэффициента подавления фона η (рис. 6) позволяет определить частоту фонон-электронной релаксации путем аппроксимации экспериментальных значений расчетными зависимостями. Определенные таким способом частоты релаксации для *Au*, *Cu*, *Be* составили соответственно 0,8; 5 и 30 ГГц, что близко к теоретическим оценкам. Уникальность МК способа определения времени релаксации неравновесных возбуждений в проводниках состоит в том, что он применим при малой длине свободного пробега квазичастиц, составляющей доли мкм.

С увеличением d происходит смещение зависимости $\eta = \eta(f)$ в низкочастотную область, что может быть вызвано неоднородной релаксацией, т.е. уходом неравновесных фононов из области контакта. При переходе к тепловому режиму частотная дисперсия претерпевает изменения, обусловленные релаксацией температуры [4, 8].

На рис. 5а показано постепенное спадание и насыщение амплитуды видеоотклика при определенном для каждого металла напряжении смещения. Такое поведение может быть связано с существованием промежуточной стадии термализации неравновесных фононов посредством фонон-фононных столкновений.

В главе 5 рассмотрены эффекты изменения формы спектра, обусловленные процессами рассеяния электронов и фононов, приводящими к комбинированному фону (рис. 3б). Частотные измерения позволяют разделить эти вклады и, исключая фононный, выделить электронный. Для этого на разностной частоте (с исключением болометрического эффекта) для контактов с различным режимом измерена энергетическая зависимость коэффициента подавления фона $\eta = \eta(eV)$. Этим обнаруживается дополнительный вклад в МК спектр.

Присутствие этого вклада приводит к характерным изменениям формы фононных особенностей (рис. 7): подъем заднего края *T*- и переднего края *L*- пика, либо переднего края группы оптических фононов в спектре *Be*. Спектральные особенности, расположенные ближе к основному максимуму, испытывают большую деформацию: у *Au* *L*- и (*T+L*)- пики деформированы сильнее, чем у *Cu*, а у *Be* комбинационный максимум не деформирован совсем. При этом наблюдаемая деформация демонстрирует присутствие вклада δ , энергетическая зави-

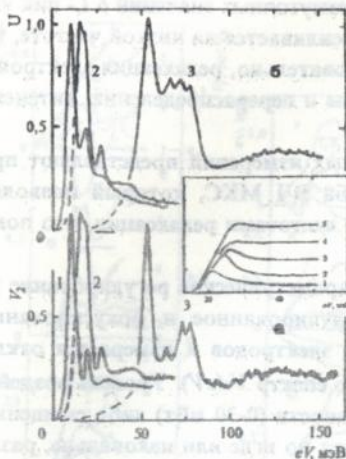


Рис. 7. МК спектр Au (1), Si (2) и Be (3) в баллистическом (а) и промежуточном (б) режимах. На вставке приведены вклады δ в МК спектр меди, обуславливающие изменение формы фоновых особенностей.

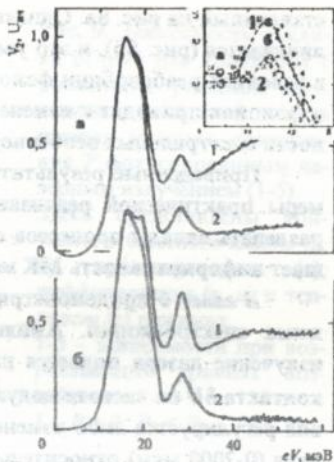


Рис. 8. Спектры медных контактов (а, б) на низкой (1) и высокой частоте (2), иллюстрирующие перераспределение интенсивности фоновых особенностей в функции параметра δ . На вставке — отношения L/T в функции параметра δ на низкой (1) и высокой частоте (2); точки а (1, 2), б (1, 2) на графике соответствуют значениям L/T и δ для приведенных спектров соответственно.

ность которого совпадает с энергетической зависимостью коэффициента подавления фона. Следовательно, релаксация электронов приводит к изменению формы фоновых особенностей.

Для каждого контакта этот вклад δ может быть выделен. Определена амплитуда и форма его энергетической зависимости $\delta = \delta(eV)$ для контактов с разным режимом (вставка к рис. 7). Вклад δ является хорошей функцией изменения режима и может быть мерой энергетической релаксации электронов, в функции которой представлена относительная величина продольного пика (вставка к рис. 8). Из нее видно, что при высокой интенсивности релаксации продольный пик мал и быстро стремится к нулю, что иллюстрирует серия спектров на рис. 4б. При низкой интенсивности — L -пик не изменяется и имеет вид, пред-

ставленный на рис. 8а. Однако для промежуточных значений δL - пик увеличивается (рис. 8б), и это увеличение усиливается на низкой частоте, т.е. в условиях реабсорбции фононов. Следовательно, релаксация электронов и фононов приводят к изменению формы и перераспределению интенсивности спектральных особенностей.

Приведенные результаты частотных измерений представляют примеры практической реализации способа ВЧ МКС, который позволяет разделять вклады процессов с разными частотами релаксации, что повышает информативность МК метода.

В главе 6 продемонстрировано параметрическое регулирование режима спектроскопии. Амплитудно-модулированное и фокусированное излучение лазера подается на один из электродов и измеряется отклик контакта δU на частоте модуляции и его спектр $V\chi(eV)$. Уровень воздействия регулируется либо изменением мощности (0-30 мВт) либо смещением луча (0-2000 мкм) относительно контакта по игле или наковальне, различающихся диаметрами (100 и 1000 мкм).

Измерен отклик при смещении луча по игле и наковальне при напряжении смещения, соответствующему максимуму нелинейности ВАХ, а также энергетическая зависимость отклика $\delta U = \delta U(eV)$, которая совпадает со спектром $V\chi(eV)$ для контактов с различными режимами.

Эти данные позволяют представить происходящие в этом случае процессы. Излучение возбуждает электроны, которые релаксируя, генерируют фононы, распадающиеся на длинноволновые. Последние достигают контакта, изменяют его температуру и сопротивление. При этом модулированное излучение приводит к модулированному потоку тепла и к модуляции сопротивления, что является альтернативой токовой модуляции для выявления нелинейностей, обусловленных электрон-фононным взаимодействием.

Однако, такое совпадение происходит лишь в некотором интервале уровней воздействия, за пределами которого происходит характерное изменение формы отклика $\delta U(eV)$ (рис. 9).

С повышением уровня воздействия растет амплитуда отклика и изменяется его форма (рис. 9б) по изложенному выше сценарию: рост фона, маскирование спектральных особенностей (рис. 4а), подъем заднего края T -пика (рис. 7). Т.е. происходит параметрическое регулирование режима пролета фононов и электронов инжекцией неравновесных фононов в область контакта от внешнего источника.

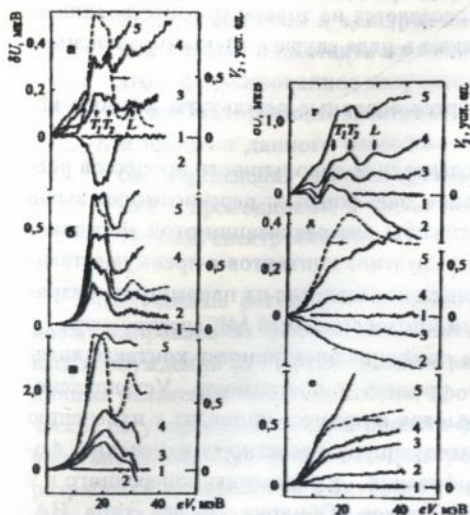


Рис. 9. Зависимость отклика $\delta U(eV)$ для контактов с различным режимом протекания тока (а-е) и при разных уровнях воздействия P фокусированным лазерным излучением (1-5).

Здесь представлены контакты в баллистическом (а, б), промежуточном (в), диффузионном (г, д) и тепловом (е) режимах.

1-5 – зависимости при возрастающих уровнях воздействия:

1 – $P = 0$; $P_2 < P_3 < P_4 < P_5$.

Изменение режима происходит переходом от баллистического к промежуточному (рис. 9б), от промежуточного к диффузионному (в) и от диффузионного к тепловому (д). Для тепловых контактов нарушение уровня пропорциональности приводит к разрушению спектроскопического режима и формированием гладкой зависимости $\delta U(eV)$ (рис. 9е, кривая 5). Эта стадия является финальной для контактов с любым режимом, в том числе баллистическим (рис. 9а, кривая 5).

При низком уровне воздействия постепенно смещается в область отрицательных значений сначала высокоэнергетическая часть (в, кривые 2-4), затем область спектральных значений (г, кривая 2) и, наконец, вся зависимость приобретает отрицательное значение, испытывая инверсию (а, д, кривые 2). Т.о., в этом случае обнаруживается эффект "просветления" контакта, т.е. уменьшение его сопротивления.

Выводы

В работе решена задача исследования сложной совокупности процессов рассеяния электронов и фононов в контакте. Особенности протекания этих процессов зависят от следующих факторов: соотношения диаметра контакта и длин свободного пробега для электронов и фононов, характерная энергия, а также частота и мощность излучения.

Сложность этой совокупности определяется не только сосуществованием различных типов рассеяния, но также в ряде случаев их взаимозависимостью и взаимовлиянием.

Ниже в виде тезисов приводятся основные результаты данного исследования.

1. Разработана методика исследования совокупности процессов рассеяния электронов и фононов, зависящей от перечисленных выше факторов. Разработаны способы для реализации этой методики, включающие получение и выделение контактов с преимущественным типом рассеяния, а также определение их параметров; разработан широкодиапазонный многоканальный МК спектрометр.
2. Показано, что факторами рассеяния электронов в контакте являются дефекты структуры, примесь и поверхность. Установлено, что как дефекты структуры, так и примесь приводят к изменению МК спектра ЭФВ соответствующему расчетному изменению фононного спектра при аморфизации – к уширению поперечного и к исчезновению продольного пиков. Обнаружено два типа НА, происхождение которых может быть связано с рассеянием на примесном кислороде и поверхности.
3. Доказано существование двух факторов формирования фона – небаллистичность по электронам и фононам. Продемонстрировано, что от соотношения их вкладов зависят свойства контактов на низкой и высокой частоте. При измерении на частотах, превышающих частоту релаксации фононов, обнаружены предсказанный теорией эффект уменьшения фона и ранее неизвестный эффект демаскирования скрытых фоном спектральных особенностей. Показано, что такие частотные измерения являются аналогом изменения баллистичности по фононам.
4. Показано, что с особенностями частотной дисперсии проводимости контакта связаны различные релаксационные явления: фонон-электронная и фонон-фононная релаксация, неоднородная релаксация фононов и релаксация температуры контакта. Определены частоты релаксации фононов в *Au*, *Si*, *Ge*, которые составили 0,8; 5 и 30 ГГц соответственно.
5. Обнаружены эффекты изменения формы и перераспределения амплитуд фононных особенностей в МК спектре ЭФВ, обусловленные релаксацией электронов и фононов.

6. Обнаружено явление параметрического регулирования режима пролета фононов и электронов инжекцией неравновесных фононов в область контакта от внешнего источника. В данном случае это – фокусированное излучение лазера, воздействующее на один из контактирующих электродов вблизи контактной области.
7. В процессе данного исследования изобретены и внедрены способы определения частоты релаксации квазичастичных возбуждений в проводниках, а также способ высокочастотной микроконтактной спектроскопии.

Полученные результаты открывают возможности исследований в новых направлениях физики микроконтактов: исследование квазичастичных возбуждений на границе раздела металл – диэлектрик; изучение различных релаксационных процессов, протекающих в контакте; параметрическое регулирование режима пролета фононов и электронов; корректное восстановление однофононных спектров из измеренных характеристик; разработка методологии факторного эксперимента в физике микроконтактов. Последнее важно именно потому, что области существования многих процессов перекрываются. Рассмотренные в диссертации случаи такого перекрытия не исчерпывают всего их многообразия. Например, с уменьшением d контакта одновременно усиливаются как роль поверхностных слоев в процессах рассеяния, так и проявление мезоскопических эффектов, которые в данной работе не освещены.

Цитируемая литература

1. И. К. Янсон, А. В. Хоткевич, Атлас микроконтактных спектров электрон-фононного взаимодействия в металлах, Наук. думка, Киев (1986).
2. И. К. Янсон, О. И. Шкляревский, ФНТ 12, 899 (1986).
3. И. О. Кулик, М. В. Москалец, ФНТ 15, 405, (1989).
4. О. П. Балкашин, И. К. Янсон, В. С. Соловьев, А. Ю. Красногоров, ЖТФ 52, 811 (1982).
5. R. W. van den Heijden et al. Appl. Phys. Lett. 37, 245, (1980).
6. И. О. Кулик, А. Н. Омелянчук, И. Г. Тулузов, Т. З. Саркисянц, ФНТ 10, 882 (1984).

7. И. О. Кулик, Письма в ЖЭТФ 41, 302, (1985).
8. Москалец М. В., ФНТ 15, 271, (1989).
9. А. Н. Омелянчук, И. Г. Тулузов, ФНТ 11, 388 (1985).
10. Ю. А. Колесниченко, Р. И. Шехтер, Поверхность 8, 49. (1990).

Основное содержание диссертации изложено в работах:

1. И. К. Янсон, О. П. Балкашин, Ю. А. Пилипенко. Релаксация неравновесных фононов в металлических микроконтактах. Письма в ЖЭТФ 41, 302-303 (1985).
2. О. П. Балкашин, И. К. Янсон, Ю. А. Пилипенко. Кинетика релаксации неравновесных фононов в микроконтактах из меди и золота. ФНТ 13, 389-400 (1987).
3. О. П. Балкашин, Ю. А. Пилипенко. Микроконтактная спектроскопия тонких пленок меди. ФТТ 33, 2584-2593 (1991).
4. О. П. Балкашин, И. К. Янсон, Ю. А. Пилипенко. Релаксация неравновесных фононов в микроконтактах из бериллия. ФНТ 17, 221-227 (1991).
5. Yu. A. Pilipenko. Scattering by the surface, impurities and structural defects in copper point contacts. ФНТ 18, 483-485, (1992).
6. И. К. Янсон, О. П. Балкашин, Ю. А. Пилипенко. Способ определения спектра квазичастиц в проводниках. Авторское свидетельство №1452411 (СССР) 1988.
7. И. О. Кулик, И. К. Янсон, О. П. Балкашин, Ю. А. Пилипенко, И. И. Кулик. Способ определения времени релаксации неравновесных возбуждений. Авторское свидетельство №1581138 (СССР) 1990.
8. О. П. Балкашин, Ю. А. Пилипенко. Кинетика релаксации неравновесных фононов в металлических микроконтактах. XXV Всесоюзное совещание по физике низких температур. Тезисы докладов. Ленинград. Ч. 3, 168-169 (1988).
9. И. К. Янсон, О. П. Балкашин, Ю. А. Пилипенко. Кинетика релаксации неравновесных фононов в металлических точечных контактах. III Международная конференция по физике фононов. Гейдельберг, ФРГ, 91 (1989).

515.222A
4232617
Pilipenko Yu. A. Scattering of electrons and phonons in metallic point contacts.

The thesis for obtaining the Candidate degree of sciences (in Physics and Mathematics), speciality 01.04.07 – physics of solid state, B. I. Verkin Institute for Low Temperature Physics @ Engineering, National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkov, Ukraine, 1995. Defended are 7 scientific works and 2 author's certificates containing the results of experimental complex investigations of scattering of electrons and phonons which results to a dependence of the electron-phonon interaction spectrum on the parameters of the contact, and frequency and radiating power. It is found that in the contact structural defects, impurities and surface are the scatters of electrons. A variation in the shape and redistribution of the amplitudes of phonon's peculiarities due to electron and phonon relaxation have been detected. The possibility of parametric control of phonon and electron transit by inspection of non-equilibrium phonons from the external source into a region of the contact is established. The proposed methods of determining the quasiparticle relaxation time as well as a high-frequency microcontact spectroscopy are implemented in practice and this efficiency is estimated.

Пилипенко Ю. О. Розсіювання електронів та фононів в металевих точкових контактах.

Дисертація на здобуття вченого ступеню кандидата фізико-математичних наук за спеціальності 01.04.07 – фізика твердого тіла, НАН України, Фізико-технічний інститут ім. Б. І. Веркіна, Харків, 1995.

Захищаються 7 наукових робіт та 2 авторських свідоцтва, що містять здобуток експериментального комплексного дослідження процесів розсіювання електронів та фононів, зумовлюючих залежність МК спектру електрон-фононної взаємодії від параметрів контакту, частоти та потужності випромінювання. Встановлено, що факторами розсіювання електронів в контактї є дефекти структури, домішки та поверхня. Виявлені ефекти зміни форми та перерасподілу амплітуд фононних особливостей, обумовлених релаксацією електронів та фононів. Виявлено явище параметричного регулювання режиму прольоту фононів та електронів інжекцією нерівноважних фононів до зони контакту від зовнішнього джерела. Впроваджено запропоновані засоби визначення часу релаксації квазічастинок та високочастотної мікроконтактної спектроскопії, приведено дані про їх ефективність.

Ключові слова:

електрони, фонони, точкові контакти, метали.

4 5326

AB 33.812

Пилипенко Ю. А.

Ответственный за выпуск

кандидат физ.-мат. наук Н. Л. Бобров.

подписано к печати 08.12.1995

Физ. п. л. 1,0

Уч. изд. л. 1,0

Заказ 46

Тираж 100 экз.

Ротапринт ФТИНТ им. Б. И. Веркина НАНУ, Харьков-164, пр. Ленина, 47.